

刘宇鹏,唐丹玲,吴常霞,等. 南海 U 形海疆线的生态环境分区特征[J]. 海洋学报, 2019, 41(2): 14—30, doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2019.02.002

Liu Yupeng, Tang Danling, Wu Changxia, et al. Zoning of the U-boundary in the South China Sea and its ecological environment characteristics[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(2): 14—30, doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2019.02.002

南海 U 形海疆线的生态环境分区特征

刘宇鹏^{1,2,3}, 唐丹玲^{1,2,3,4*}, 吴常霞^{1,5}, 葛晨东^{6,7,8}

(1. 中国科学院南海海洋研究所 热带海洋环境国家重点实验室, 广东 广州 510301; 2. 中国科学院南海海洋研究所 广东省海洋遥感重点实验室, 广东 广州 510301; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 21 世纪海上丝绸之路协同创新中心, 广东 广州 510420; 5. 达尔豪斯大学, 加拿大 哈利法克斯 B3H 4R2; 6. 南京大学 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210023; 7. 南京大学 中国南海研究协同创新中心, 江苏 南京 210093; 8. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 南海 U 形海疆国界线(简称南海 U 形线)是我国的南海国界线。该研究分析多源卫星遥感和 GIS 数据, 系统研究南海 U 形海疆线水域的水深地形和环境生态要素, 并重点分析 2014 年生态要素的季节变化, 首次整体展现了南海 U 形线立体水深分布特征。根据海底地形的平缓、波峰、波谷和递增四大特征, 将南海 U 形线分为东北、西北、东、西和南区 5 个区间。南海 U 形线总长大于 4 000 km。西北区和南区的水深浅且变化平缓(<1 000 m), 西区水深呈波峰分布(平均 2 303 m), 东区水深由南向北递增(>2 000 m); 东北区水深最深且呈波谷分布(平均 3 535 m)。南海 U 形线的 5 个区间, 西北区与北部湾盆地、西区与越东断裂、南区与曾母盆地、东区与南海海槽、东北区与马尼拉海沟地形构造相吻合。研究发现季风对南海 U 形线 5 个区间海洋环境季节性变化有明显影响: 西北区和东北区海表温度温差大, 呈冬季最低夏季最高, 混合层深度冬季最深春季最浅, 海表流场和海表盐度季节变化小, 但西北区海表叶绿素 *a* 浓度冬季爆发, 其余季节呈对数分布, 而东北区冬季区内中部略有增长; 西区、南区 and 东区海表温度盐度季节变化小, 海表风场和混合层深度冬季最强春季最弱, 但海表叶绿素 *a* 浓度西区季节变化小, 南区区内中部冬季增长明显, 东区区内南部冬季小幅增长。西北区和南区(浅地形区)呈相似的季节分布。研究阐明了 5 个区间具有各自明显的区域性海洋环境特征: 西北区海表温度和海表叶绿素 *a* 浓度的季节变化最大、西区混合层深度季节变化最大、南区海表流场季节变化最大、东区海表盐度季节变化最大、东北区风场变化大但海表叶绿素 *a* 浓度季节变化小。研究显示, 南海 U 形线上的台风路径时空分布南北差异大, 东西不均。1945—2016 年共 604 个台风跨南海 U 形线, 年均 8 个, 路径集中在东北、西北、东 3 个区, 112.3°E 以东台风 537 个, 112.3°E 以西 415 个。南海 U 形线东北区的生态环境受台风“风泵效应”影响最大。1991—2000 年为台风多发期, 跨线台风年均达 11 个。研究提出的南海 U 形海疆线 5 区间分法, 具有科学意义和实践指导作用。

关键词: 南海 U 形海疆线; 地形; 5 区间分法; 海洋生态环境; 季节变化; 台风

中图分类号: P737.27

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2019)02-0014-17

收稿日期: 2018-04-23; **修订日期:** 2018-08-13。

基金项目: 国家自然科学基金(41876136, 41430968); 广东国际战略研究院 2017 年度招标课题重大课题“南海疆界线的科学表征及其海洋环境研究”(17ZDA24); 广东省海洋遥感重点实验室(LORS)2018 年度开放基金(2017B030301005); 21 世纪海上丝绸之路协同创新中心海洋环境科学重大项目(2015HS05)。

作者简介: 刘宇鹏(1994—), 男, 广东省珠海市人, 博士研究生, 主要从事海洋生态遥感研究。E-mail: liuyupeng99@163.com

*** 通信作者:** 唐丹玲, 研究员, 主要从事海洋生态遥感、“风泵”理论和南海生态环境研究。E-mail: lingzistdl@126.com

1 引言

中国南海 U 形海疆国界线,简称“南海 U 形线”,是我国主张南海权益的重要证据^[1]。中国在南海的 U 形疆界线可见于 1914 年地图^[2],1948 年政府公布的南海 U 形线的疆界范围沿袭至今^[1,3]。最新研究报道 1951 年出版的《中华人民共和国新地图南海分图》以连续国界线和行政区划线绘制南海 U 形线^[1],沿袭了 1948 年政府公布的南海 U 形线疆界范围。“南海 U 形海疆线”表征中国的南海疆界线不仅便于记忆,更充分体现南海 U 形线的中国权属和国界线的法律地位^[1]。

经大量历史与社会科学研究^[1,4-10]后,为全面了解南海 U 形线,更需了解南海 U 形线的海洋环境特征。而水深地形作为最稳定的海洋环境特征,更需首先进行全面和细致的了解。王颖团队通过研究约 30% 的南海 U 形线地形,证实了该部分南海 U 形线的划线主要按浅海盆地、海峡处采用“等距离中间线”的地形原则进行,在地形变化明显处沿海槽坡麓或海槽槽沟中线划分,在西南陆坡陆架区结合岸线走势与地形进行划分^[11]。为进一步阐述划线的科学性,我们亟需认识南海 U 形线另外约 70% 的地形特征。

南海 U 形海疆线水深地形的整体分布特征如何? 如何为 4 000 多千米长的 U 形海疆线进行科学分区,是南海 U 形线自然科学研究亟需深入研究但尚未进行研究的重大问题。只有解答这些科学问题才能为开展南海 U 形线海洋环境的全面认识作好铺垫,为今后南海 U 形线的海洋环境分析、海洋工程建设^[12]提供便捷的描述方式和重点关注区域,进而为南海 U 形线的海洋资源利用和保护、海上丝绸之路的建设提供有力的科学依据。而最新研究获得的 1951 年连续南海 U 形线地图^[1],为本研究进行南海 U 形海疆国界线的地形和生态环境特征整体性的研究提供了海疆线的重要历史和科学依据。

本文利用前期研究发现的 1951 年以连续国界线和行政区划线绘制的《中华人民共和国新地图南海分图》,结合遥感和 GIS 方法,利用多种遥感数据、实测数据等研究南海 U 形线上的水深和三维特征,分析 2014 年南海 U 形线上的生态环境因素和台风状况,并探讨了南海 U 形线的海洋生态环境分布特征。本文首次研究了完整南海 U 形海疆线的自然环境特征,提出了南海 U 形海疆线的 5 区间分法,具有开创性和重要现实意义。

2 研究区域和数据

2.1 研究区域

南海 U 形海疆线内范围($3^{\circ} \sim 25^{\circ} \text{N}$, $105^{\circ} \sim 125^{\circ} \text{E}$)包括大约 $3.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ 海域,是我国近海最大最深的边缘海,也是世界上最大的半封闭的孤立海盆,平均深度超过 1 200 m,最大深度超过 5 300 m(位于马尼拉海沟南端)^[13]。南海 U 形线西北背靠亚洲大陆,东北、东南、西南周边环绕众多的岛屿与岛弧,自东北到西南主要的岛屿有台湾岛、吕宋岛、巴拉望群岛、加里曼丹岛、苏门答腊岛和马来半岛。南海 U 形线内分布着诸多岛屿和浅滩,包括台湾浅滩、海南岛、东沙群岛、中沙群岛、西沙群岛、南沙群岛等^[1]。

南海 U 形海疆线范围内的南海海域是一个寡营养性海域,上升流、季风、台风和内波等往往加强海水垂直混合,使营养盐跃层变浅,导致海洋藻华、改变海洋初级生产力^[14]。

2.2 数据

利用 1948 年正式发布和 1951 年新报道的两张南海 U 形海疆线地图,提取“南海 U 形海疆线”的连续南海 U 形线经纬度信息^[1],定位出完整的南海 U 形线地理位置并计算其长度。为了便于数据显示,以距离南海 U 形线两侧各 12 海里为绘图显色范围。结合全球地形起伏模型(ETOPO2)的海底地形数据和各种海洋要素的遥感数据,分析展示南海 U 形线上水深分布,综合分析 2014 年南海 U 形线上海洋环境生态的季节变化特征。其中海表高度异常(sea level anomaly, SLA)、海表风场(sea surface wind field, SSW)和海表流场(sea surface currents, SSCs)数据分辨率为 $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ 与南海 U 形线绘图显色范围相近。分析所有经过南海 U 形线的台风数量变化,并绘制 1945—2016 年共 72 年的台风路径。

2.2.1 经纬度与 1948 年和 1951 年南海 U 形线图

利用 ArcGis 软件,对 1948 年和 1951 年南海 U 形线图采用北京 54 坐标系统进行投影变换和坐标转换,并通过控制点对其进行几何校正,以 1951 年地图(图 1b)为主(有连续南海 U 形线位置),1948 年地图(图 1a)为辅(有北部湾、吕宋海峡部分等),得出完整的南海 U 形线精确的矢量化图,提取南海 U 形线上经纬度,并利用 Matlab 绘制南海 U 形线海洋要素图像。

2.2.2 遥感数据

地形数据采用 ETOPO2,美国国家地球物理数

据中心(US National Geophysical Data Center)的 2 分

分辨率的全球高程和水深的格网数据。

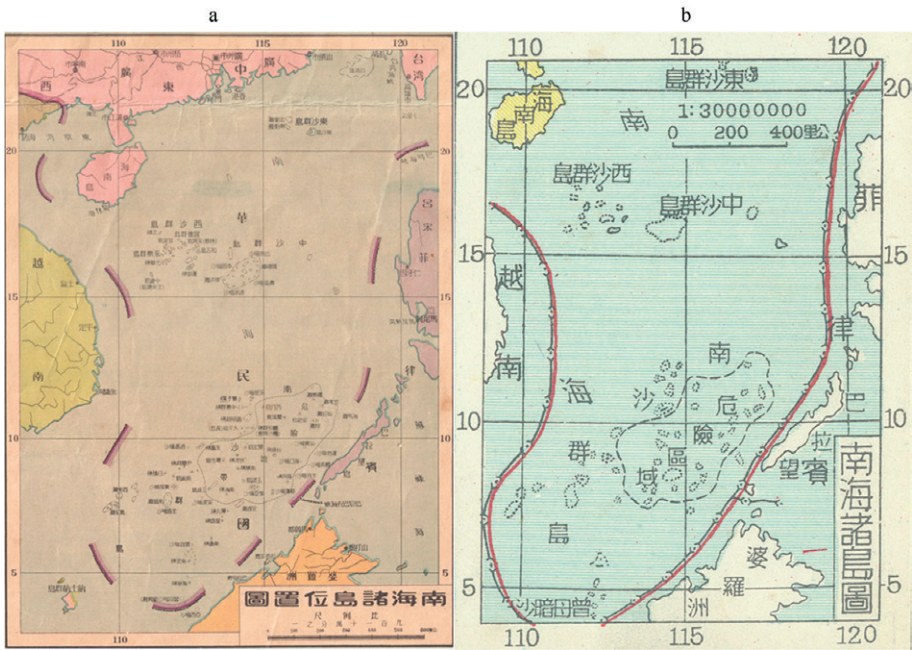


图 1 南海 U 形线地图

Fig.1 Map of U-boundary in the South China Sea

a. 1948 年中国首次官方发布的南海 U 形线地图^[5]; b. 1951 年首次报道的连续南海 U 形海疆线地图

a. The first official released map of U-boundary in China in 1948^[5]; b. the first reported map with continuous U-boundary in 1951

SLA 数据采用 Aviso 提供的高度计的多用途产品。本研究选取空间分辨率为 25 km×25 km 的月平均成品数据,通过 Matlab 获取 2014 年 4 个季节的平均数据。

海表叶绿素、海表温度数据采用中分辨率成像光谱仪(MODIS Aqua)的 4 km 季度平均的叶绿素 *a* 浓度(chlorophyll *a* concentration, Chl *a*) L3 成品数据和 4 km 季度平均的海表温度(sea surface temperature, SST) L3 成品数据。

海表盐度(sea surface salinity, SSS)数据采用物理海洋学的分布式主动归档中心(PODAAC)提供的 Aquarius 空间分辨率 1°×1°、时间分辨率为一个季度的数据(<http://apdrc.soest.hawaii.edu/las8/>)。

SSW 数据:采用由 NASA 地球科学研究项目和 NASA 地球科学物理海洋学计划提供的星载极化微波辐射计(WindSat)测量、用 7.0.1 版算法所得的空间分辨率为 25 km×25 km,时间分辨率为一个季度数据。

SSCs 数据:采用欧洲空间局(ESA)的用户单元(DUE)项目所提供的模型估计的洋流数据(<http://globcurrent.ifremer.fr/>)。空间分辨率 25 km×

25 km,时间分辨率为每天,通过 Matlab 融合得 2014 年各季节平均数据。

2.2.3 数据说明

本文主要分析南海 U 形线的各海洋要素数据及其季节变化,因此图像(图 2 至图 5)的绘制和显示仅表现了海上部分,其与陆地国界线是相连并准确吻合的。

各海洋要素平面图和折线图(图 3 至图 5)中的间断表示数据在相应区域缺失,是由于近岸遥感数据受到空间分辨率和云层的影响,虽然 SSW、混合层深度(mixed layer depth, MLD)和 SSS 数据在部分区域存在缺失,但这些要素在各区间的缺失量不超过 20%,它们的分布特征和变化趋势仍然具有代表性,同时在文中也将各要素与前人研究结果比对进一步验证结论的准确性,因此该数据缺失对结论的影响很小。

为准确和清晰展现南海 U 形海疆线的水深地形和各海洋要素,文中南海 U 形海疆线的填色范围选取的是:以南海 U 形海疆线为中线,左右两侧垂直南海 U 形海疆线各取 12 海里为填色范围(即宽约 44.45 km)进行绘图。

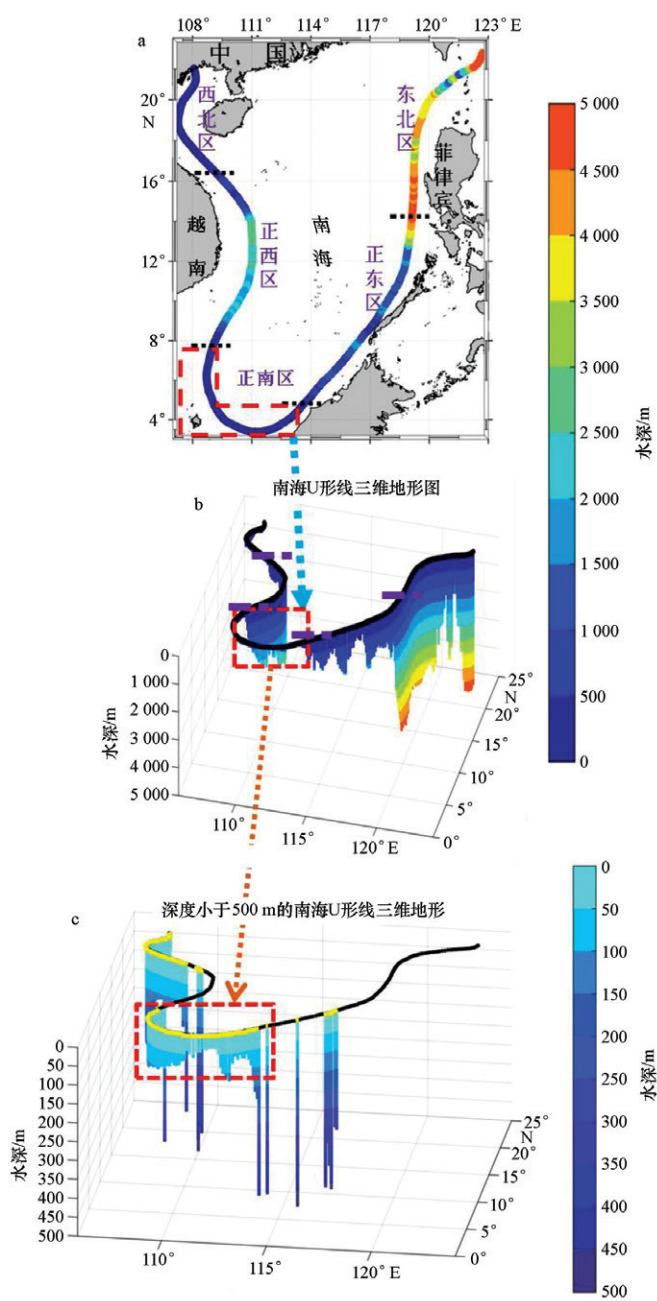


图 2 南海 U 形海疆线水深三维结构图

Fig.2 The 3D depth of U-boundary in the South China Sea

a. 南海 U 形线上平面水深图,黑虚线表示南海 U 形线 5 区间分法的区间位置(填色表示水深 0~5 000 m);b. 图 a 顺时针旋转 30°的 3D 水深图,紫虚线表示南海 U 形线 5 区间的界线位置(填色表示水深 0~5 000 m);c. 深度小于 500 m 的南海 U 形线的局部水深图(南海 U 形海疆线黄色部分表示水深小于 500 m,填色显示(0~500 m);黑色部分水深大于 500 m,没有填色表示水深)

a. Water depth of U-boundary, black dotted line shows the position of the 5 segment method on the U-boundary (color means water depth 0-5 000 m); b. clockwise rotation 30° 3D map of figure a, purple dotted line shows the segment positions of the 5 zones on the U-boundary (color means water depth 0-5 000 m); c. the water depth lower than 500 m of the U-boundary (the yellow zones of the U-boundary indicate the terrain <500 m and with color display. The black zones of the U-boundary indicate the terrain >500 m and without color display)

3 研究结果

3.1 南海 U 形海疆线水深的空间变化及其分区

图 2 为南海 U 形海疆线地形是实际地形深度与经纬度比例放大 444 倍后的显示结果。为有利于清晰和系统性阐述南海 U 形线的水深及生态环境特征,本研究对南海 U 形线进行分区间描述,并分析各区的内在联系和特征。分区方法如下:依据南海 U 形线整体的下伏地形、水深分布特征(图 3a),按照水深深浅分布及变化缓急,将南海 U 形线分成西北区、西区、南区、东区和东北区共 5 个区(图 2a 黑虚线),分类依据见表 1。图 2a 展示的是南海 U 形线水深平面分布图及其 5 个区间的情况;图 2b 显示了南海 U 形线水深的三维分布图;图 2c 则是为便于清晰展现浅水区域($<500\text{ m}$)的三维分布特征,将图 2b 中南海 U 形线上水深小于 500 m 的区域(图 2c 黄色南海 U 形海疆线)的三维水深进行放大显示,其中图 2c 黑色南海 U 形海疆线的区域表示其水深大于 500 m ,不绘制显示该区域的三维水深。

从图 2 和图 3a 分析发现,南海 U 形线上西北区和南区水深较浅,普遍浅于 $1\,000\text{ m}$,且地形变化平缓。西北区近岸有大陆坡的存在,水深较浅且变化平缓。南区附近海域岛屿众多,位于曾母盆地,水深较浅且变化不大,在靠近东区(巴拉望岛北缘)的南海 U 形线水深开始变深且变化较大。南海 U 形线上西区,水深变化呈中间高两边低的波峰形态,平均水深为 $2\,303\text{ m}$,波峰处水深超过 $2\,600\text{ m}$,该波峰区域也是舌状浮游植物藻华爆发的发生区。南海 U 形线上东区及东北区水深都超过 $3\,000\text{ m}$,最深达 $4\,998\text{ m}$;东区水深呈由南向北波动递增的分布;东北区水深呈中间低两边高的波谷状,地形变化最为剧烈,是南海 U 形线 5 个区中最深的区域,该区位于南海 U 形线与太平洋的海水交换区,地形较深,是黑潮入侵的主

要区域。

通过 ArcGis 均匀地获取的南海 U 形线上 400 个点的经纬度,将 400 个点两两间的欧氏距离相加,平滑了南海 U 形线实际的弯曲细节,得到南海 U 形线全长约大于 $4\,000\text{ km}$ 。

3.2 南海 U 形海疆线的 5 个区间的海洋动力因素

3.2.1 南海 U 形线西北区

南海 U 形线西北区 2014 年风速没有明显的季节变化(图 4a),平均风速为 6.5 m/s ,风向春季东南风,夏季西南风,秋冬两季东北风;SSCs 季节变化小,4 个季节流速都低于 0.2 m/s ,且区内 SSCs 强度分布均匀;SLA 呈明显季节变化,且区内季节内分布均匀,秋季最高,夏季最低,冬季强于秋季;MLD 冬季明显高于其余 3 个季节,冬季最深深度($>40\text{ m}$)出现在区内的北部,其余 3 个季节区内分布都很均匀且深度较低($<15\text{ m}$)。

3.2.2 南海 U 形线西区

南海 U 形线西区 2014 年风速季节变化较为复杂,春季最低秋季最高,但该区北部与南部夏秋两季分布相反,北部秋季风速与冬季相当,明显高于春夏季,南部夏季风速高于秋季,而风向呈现与西北区相同分布:春季东南风,夏季西南风,秋冬两季东北风;春季开始出现反气旋式涡旋,海流逐渐增强,夏季出现强的东北流向离岸流,海流强度迅速增强,在区内中部出现急剧变化的波峰,最高值达 0.85 m/s (图 3c),秋季出现强西南向海流,海流流速依然较高,冬季出现自北向南海流,SSCs 减弱;SLA 季节变化较为明显,但区内分布不均(图 4c),区内北部秋季最高夏季最低,秋冬两季变化不大,区内南部夏季最高冬季最低,春季高于秋季;MLD 冬季明显高于其余 3 个季节,冬季最深深度($>40\text{ m}$)出现在区内的北部,其余 3 个季节区内分布都很均匀且深度较低($<15\text{ m}$)。

表 1 南海 U 形海疆线 5 区间范围及其特征

Tab.1 Segmentation ranges and characteristics of the five zones in the U-boundary in the South China Sea

区间	西北区	西区	南区	东区	东北区
范围	22.5°~16°N	8°~16°N	3°~8°N	8°~16°N	23.5°~16°N
	107°~111°E	115°~120°E	108°~111°E	108°~112°E	117°~123°E
划分类型	平缓浅地形	波峰地形	平缓浅地形	指数状地形	波谷地形
地质构造	北部湾盆地、 莺歌海盆地	越东断裂	曾母盆地、 万安盆地	南沙海槽	吕宋海槽、 马尼拉海沟

续表 1

区间	西北区	西区	南区	东区	东北区
环境特征	SST 季节变化最大, Chl a 季节变化最大	MLD 季节变化最大, Chl a 季节相对变化最小	SSCs 季节变化最大, Chl a 季节相对变化较大	SSS 季节变化最大, Chl a 季节相对变化较大	SSW 和 SSCs 变化大, Chl a 季节相对变化小
影响因素	半封闭地形	西边界流和急流	岛礁众多, 陆源输入	位于西太平洋暖池与副高交界区	西太平洋与南海水交换

3.2.3 南海 U 形线南区

南海 U 形线南区 2014 年 SSW 呈明显季节变化, 区内各季节风速分布均匀, SSW 冬季最强呈东北风, 春季最弱风向较为无序, 夏季强于秋季且风向由西南风向东北风转变; SSCs 呈明显季节变化, 春季开始出现反气旋式涡旋, 夏季反气旋式环流形成, 秋季出现强西南向海流, 冬季开始转换成气旋式涡旋, 强度明显减弱, 该区整体呈秋季最强, 春冬两季最弱, 区内秋季北部增强最大南部较小的分布特征; SLA 也存在季节变化, 区内分布春夏秋冬均匀, 秋季最高春季最低, 冬季分布呈波峰状, 区内中部冬季高于秋季, 两端秋季高于冬季; MLD 季节变化较小, 区内分布除西北部冬季明显高于其余 3 个季节, 其余线上 4 个季节分布均匀且变化较小。

3.2.4 南海 U 形线东区

南海 U 形线东区 2014 年 SSW 呈明显季节变化, 春季、秋季和冬季都呈东北风, 夏季呈西南风, 区内各季节风速分布均匀, 但冬季最高, 春季最低, 夏季高于秋季; SSCs 季节变化小, 4 个季节流速都低于 0.2 m/s, 且区内 SSCs 强度分布均匀; SLA 季节变化明显, 秋季最高春季最低, 区内春夏秋冬季节分布均匀而冬季呈由南向北递减分布; MLD 季节变化分布均匀, 冬季略高于秋季, 秋季略高于春夏季。

3.2.5 南海 U 形线东北区

南海 U 形线东北区 2014 年 SSW 季节变化明显, 风向与东区呈相同分布即春季、秋季和冬季都呈东北风, 夏季呈西南风, 但风速冬季最高, 春季最低, 秋季高于夏季, 秋季与冬季在区内呈现相同的波峰状分布, 最高风速达 11.5 m/s; SSCs 秋冬季最强, 春夏季较弱, 整体流速较强, 区内分布北部强于南部, 春季区内北部有西北向 SSCs, 到夏季该 SSCs 减弱, 秋季该西北向 SSCs 范围明显扩大, 强度增强, 产生南海贯穿流, 并一直延续到冬季, 冬季强度稍有减弱; SLA 夏季最高冬季最低, 区内夏季呈波峰状, 波峰出现在区内南部, 冬季呈波谷状, 波谷出现在区内南部; MLD

季节变化明显, 冬季最高, 春夏季最低, 春夏秋季区内分布均匀, 冬季区内北部略高于南部(图 3e)。

3.3 南海 U 形海疆线 5 个区间的海洋生态特征

3.3.1 南海 U 形线西北区

南海 U 形线 2014 年西北区 SSS 没有明显的季节变化, 平均盐度都在约 33.25, 区内分布均匀(图 3f); SST 季节变化最明显, 夏季最高冬季最低, 春夏两季相近, 区内分布呈由北向南季节变化减小, 冬季最低温位于区内最北区($<18^{\circ}\text{C}$); 海表 Chl a 季节变化明显, 冬季最高, 春夏秋季相近, 区内夏季呈现波峰状分布, 波峰分布在区内中部偏北, 最大值达 10 mg/m^3 , 区内其余 3 个季节呈由北向南对数分布, 最高值出现在靠近陆地的线上。

3.3.2 南海 U 形线西区

南海 U 形线西区 2014 年 SSS 没有明显的季节变化, 且季节内 SSS 分布趋势相同, 最南部出现波谷, 最低值低于 31.75, 其余区域分布均匀(图 3f); SST 区内季节内分布均匀, 冬季最低春夏秋冬相近, 冬季和其余季节最大温差保持在 5°C 以内(图 5b); 海表 Chl a 没有明显季节变化, 区内分布均匀且含量很低($<0.2\text{ mg/m}^3$)。

3.3.3 南海 U 形线南区

南海 U 形线南区 2014 年 SSS 没有明显的季节变化, 平均盐度都在约 33.25, 区内分布均匀(图 3f); SST 季节内分布均匀, 冬季最低春夏秋冬相近, 春夏秋季温度大于其余 4 个区, 冬季和其余季节大于 4°C (图 5b); 海表 Chl a 季节变化明显, 冬季最高, 春夏秋季相近, 区内冬季分布呈波峰状, 波峰位于区内中部, 最高值大于 9 mg/m^3 , 区内春夏秋冬季节分布均匀且含量较低($<0.4\text{ mg/m}^3$)。

3.3.4 南海 U 形线东区

南海 U 形线东区 2014 年 SSS 没有明显季节变化, 区内中部出现明显的盐度高值区, 最高盐度达 35.5, 其余区域分布均匀(图 3f); SST 季节内分布均匀, 冬季最低春夏秋冬相近, 冬季和其余季节平均温差约 3°C (图 5b); 海

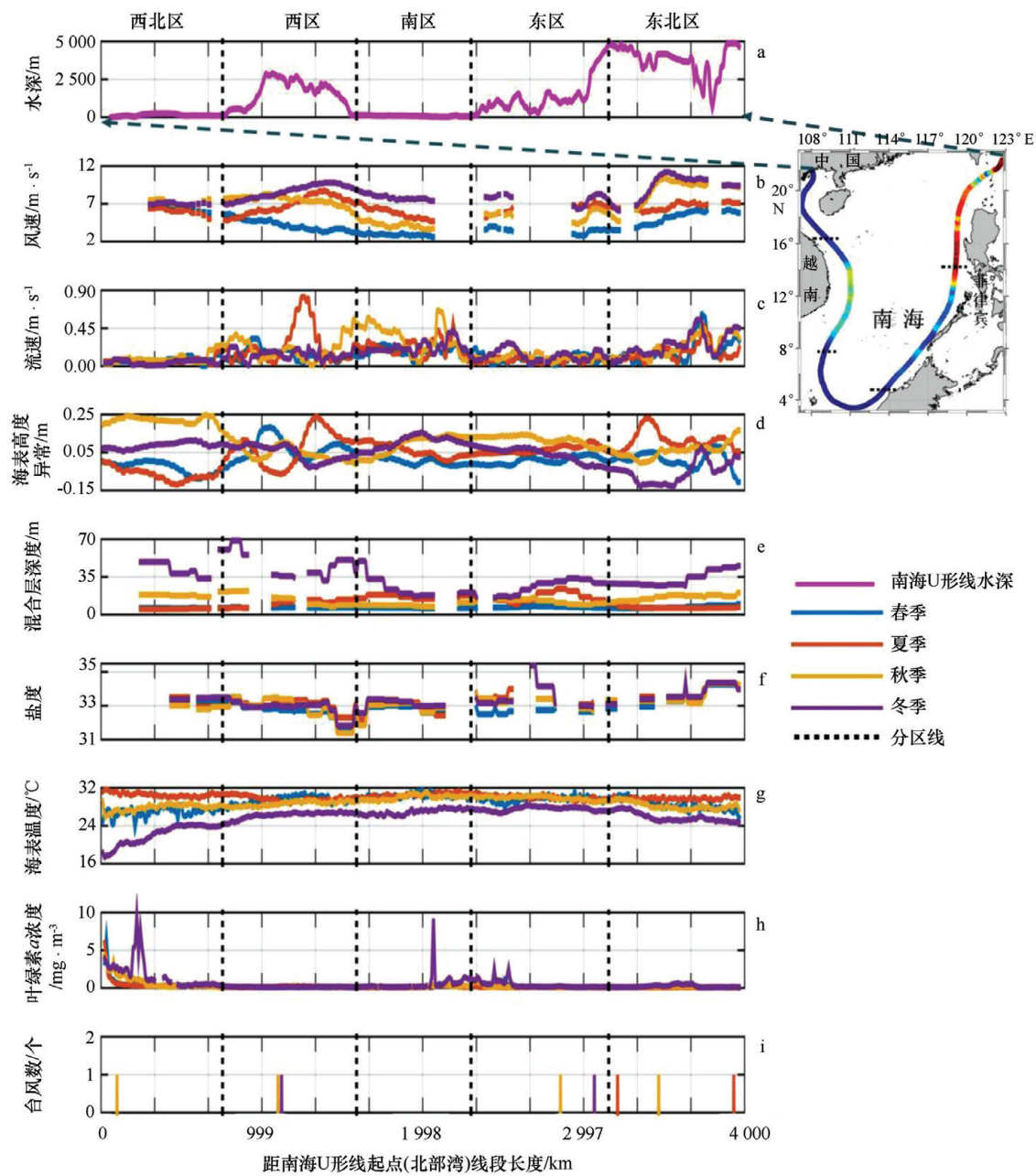


图3 南海 U 形海疆线水深(a),2014 年 4 个季节风速(b)、海表流场(c)、海表高度异常(d)、海洋混合层深度(e)、海表盐度(f)、海表温度(g)、海表叶绿素 a 浓度(h)、台风数(i)

Fig.3 Water depth (a) and seasonal sea surface wind speed (b), sea surface currents (c), sea level anomaly (d), mixed layer depth (e), sea surface salinity (f), sea surface temperature (g), sea surface chlorophyll a concentration (h), typhoon number (i) of U-boundary in 2014

黑色虚线表示南海 U 形线 5 区间划区位置,折线图空缺位置表示数据缺失

Black dashed lines indicate divided lines of the 5 zones in the U-boundary, gaps of each line only indicate missing data

表 Chl a 存在季节变化,冬季最高,春季高于夏秋季,区内冬季分布在南部出现两个小峰值(3 mg/m³),春季在冬季两峰值处也出现小峰值(1.2 mg/m³),夏秋季节区内分布均匀且较低(<0.2 mg/m³)。

3.3.5 南海 U 形线东北区

南海 U 形线东北区 2014 年 SSS 没有明显季节变化,区内分布季节变化小,都呈波谷状,波谷出现在区内中部,最低值达 33.75(图 3f);SST 冬季最低

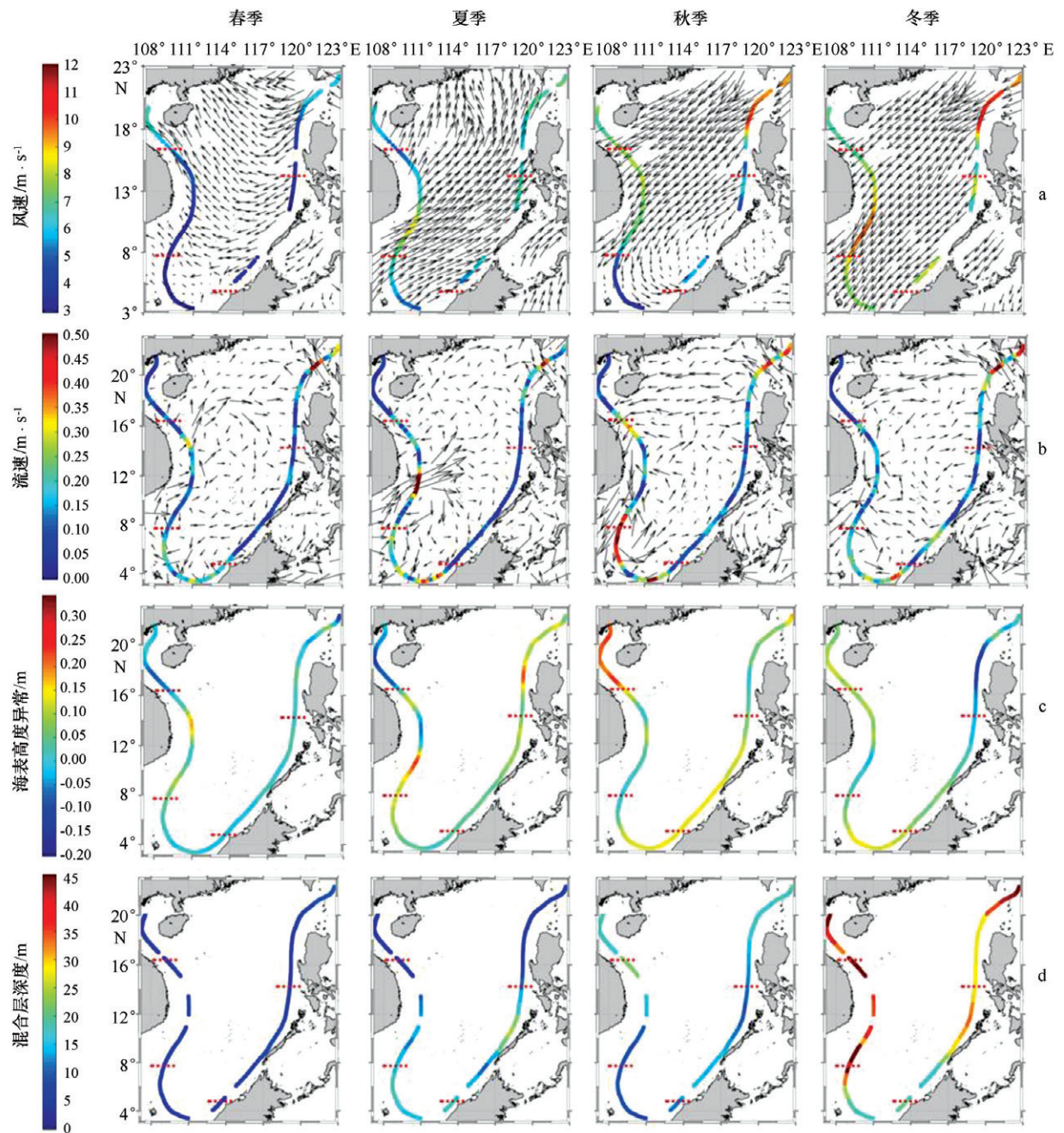


图 4 2014 年南海 U 形海疆线上 4 个季节的风速(a)、海表流场(b)、海表高度异常(c)、海洋混合层深度(d)

Fig.4 Seasonal sea surface wind speed (a), sea surface currents (b), sea level anomaly (c), mixed layer depth (d) of the U-boundary in 2014

红虚线表示 U 形线 5 区间划区位置,断开的地方仅表示数据空缺

The red dotted lines indicate the divided lines of the 5 zones in the U-boundary, gaps of each picture only indicate missing data

夏季最高,春秋两季相近,区内季节内分布较为均匀,冬季与夏季温差($<5.5^{\circ}\text{C}$)小于西北区($>6^{\circ}\text{C}$);海表Chl *a*存在较弱的季节变化,冬季略高于春夏秋季,区内冬季在中部出现小波峰,最大值为约 0.65 mg/m^3 ,区内其他季节分布均匀且含量较低($<0.2\text{ mg/m}^3$)。

3.4 穿过南海 U 形海疆线的台风

从 1945 年至 2016 年,经过中国的南海 U 形海疆线的台风数共 604 个(图 6),年均 8 个台风经过南海 U 形线。以南海 U 形线南端的曾母暗沙所在经度约 112.3°E 为界线划分南海 U 形线东西两部分,分别统计并分析其进出南海 U 形线的台风数,其中东部 537

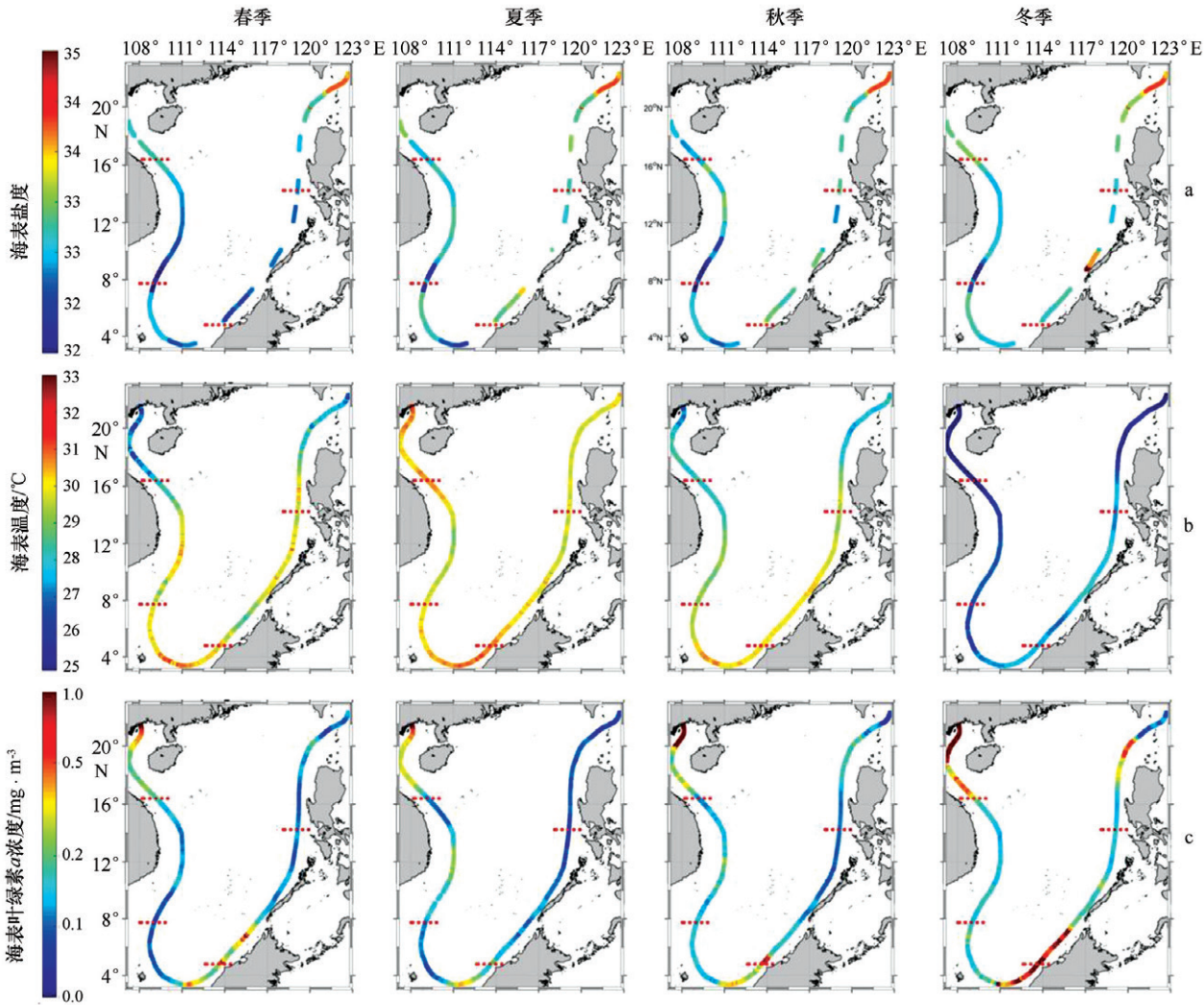


图 5 2014 年南海 U 形海疆线上 4 个季节的海表盐度(a)、海表温度(b)和海表叶绿素浓度(c)

Fig.5 Seasonal sea surface salinity (a), sea surface temperature (b), sea surface chlorophyll a concentration (c) of the U-boundary in 2014

红虚线表示南海 U 形线 5 区间划区位置, 断开的地方仅表示数据空缺

The red dotted line indicates the divided lines of the 5 zones in the U-boundary, gap of each picture only indicates missing data

个, 占经过南海 U 形线总台风数的 89%, 西部有 415 个, 占总台风数 68.4% (图 7), 台风对南海 U 形线东部影响大于西部。图 7 所示南海 U 形线各区每 10 年台风数, 由于存在同时经过东北区到达西北区的台风, 在东北区和西北区都被统计一次的情况, 因此 5 个区的总台风数可能大于合计的实际台风数。

跨过南海 U 形线水域的台风东部多于西部, 北部多于南部, 主要集中在西北区、东北区和东区, 分别占南海 U 形线总台风数的 34.1%、60.4% 和 30.3%, 南海 U 形线上 7°N 以南的台风数量少于 1%。86% 的台风路径是从东北区出入南海, 部分路径甚至穿过西北区和西区。1991—2000 年为台风高发期, 比其他

每 10 年台风数高出 14 个以上。同时也存在明显的季节性变化, 跨过南海 U 形线的台风 50.5% 发生于秋季, 并主要影响东北区、西北区和东区。为易于分辨经过南海 U 形线各区台风路径, 图 6 中分别赋予 5 种颜色, 同时为便于显示不同区台风数, 西北区路径绘制 110°E 以西部分, 西区 112°E 以西部分, 南区绘制 113°E 以西部分, 东区绘制 113°E 以东部分, 东北区绘制 118°E 以东部分。

4 讨论

4.1 南海 U 形线地形水深特征及 5 区间分法

海底地形作为海洋固有因素, 受海陆空影响变化

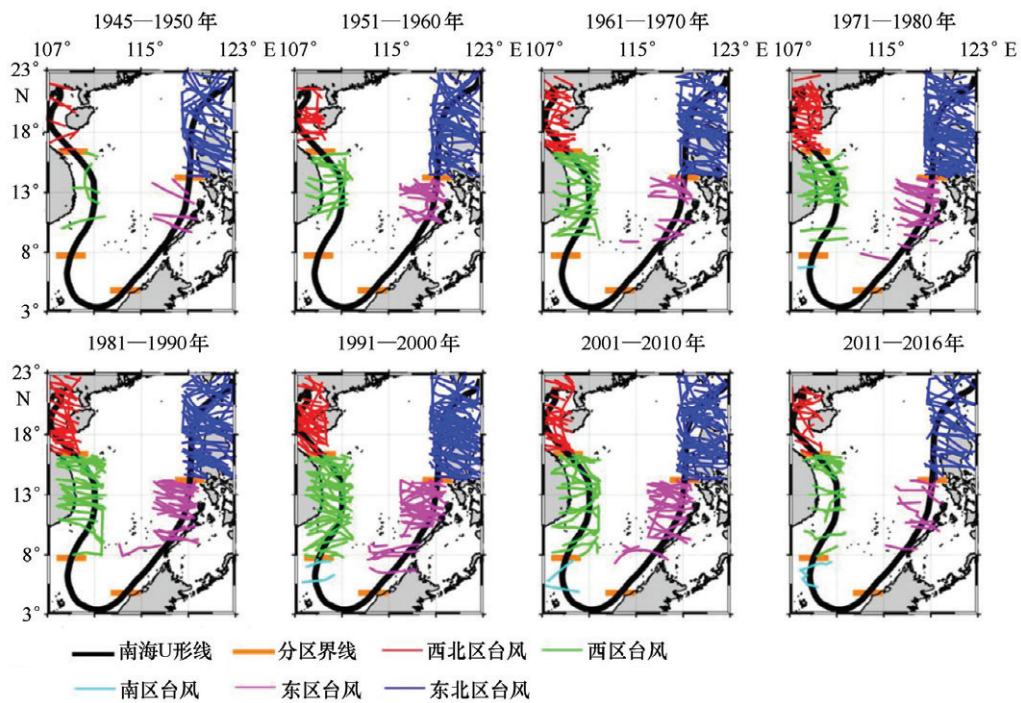


图 6 1945—2016 年穿过南海 U 形海疆线的台风路径

Fig.6 Typhoon paths on U-boundary from 1945 to 2016

橙色线段为南海 U 形线 5 区间划区界线,彩色为南海 U 形线不同区间的台风路径,黑实线为南海 U 形线
The yellow line is divided line of the five zones in the U-boundary, the color lines represent for typhoon paths on different part of U-boundary, black line is the U-boundary

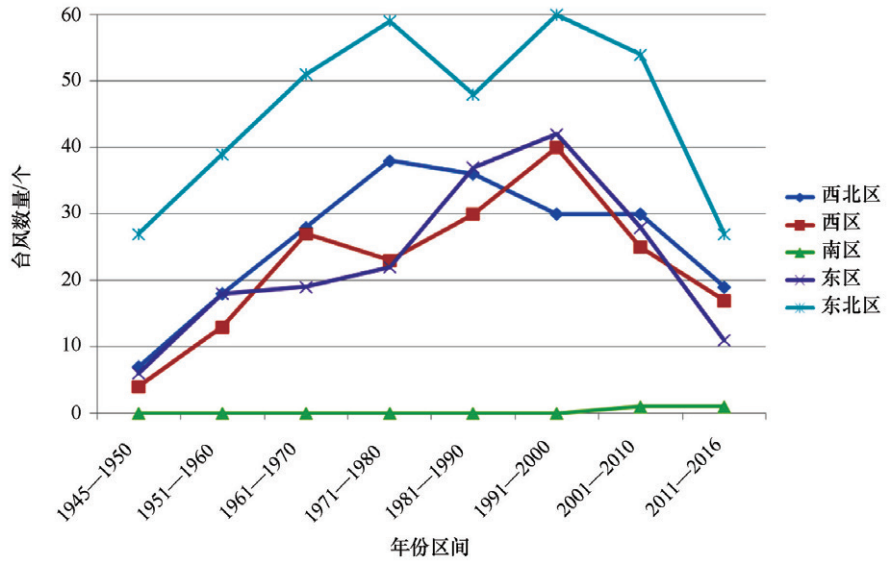


图 7 1945—2016 年每 10 年跨过南海 U 形海疆线台风数量统计

Fig.7 Line chart of typhoons across the U-boundary in the South China Sea per 10 a from 1945 to 2016

小,稳定性高,而且对海洋生态环境变化的影响也较小,因此我们选用地形特征对南海 U 形海疆线进行区间划分,可作为稳定分区标准、易于应用。具体分

区地形特征和分区方法如下:

南海 U 形海疆线东北区水深呈现波谷分布特征,整体水深最深(图 2b,图 3a),位于马尼拉海沟西

缘(地质构造借鉴夏戡原等^[15]“南海海疆线、盆地及测线分布图”),是南海和西太的主要海水交换通道。吕宋海峡净流量为年均 5.7 Sv($1\text{ Sv}=1\times 10^6\text{ m}^3/\text{s}$),经过长的历史时间的海水冲刷下蚀作用,吕宋海峡附近海底地形很深^[16]。

南海 U 形线东区整体水深较深,呈由南向北递增的水深分布特征(图 2b,图 3a),研究发现,其位于南海海槽东缘,与南海海槽走向一致。该海槽和南海海盆向南扩张以及南海海盆在加里曼丹西北部和巴拉望之下发生俯冲相关^[17]。

而南区水深较浅,因其位于曾母盆地和万安盆地,地形平坦,水深变化不大,呈浅地形(图 2b,图 3a)。

西北区水深地形变化平缓,位于北部湾盆地和莺歌海盆地,水深较浅(图 2b,图 3a)。这两个盆地与南海大陆架都是海蚀海积夷平的海底^[18]。

西区整体水深较深,由于南海 U 形线西部向内凹向海盆中央,靠近南海海盆,即中部位于中建南盆地。本研究发现,南部和北部与越东断裂走向一致,因此呈现中间深两边浅的波峰分布特征(图 2b,图 3a)。

南海 U 形线上水深整体呈现东北区最深(平均 3 535 m),西区次之(平均 2 303 m),东区(平均 < 1 400 m)深于西北区和南区(< 1 000 m)的分布趋势,这与最新研究结果^[15,19]相符。

而海洋中地形分布特征是最明显、最突出且最易于识别的特征,且不同的地形分布特征的海洋水体含量、能量及其运动不尽相同,故依据地形特征易于快速并稳定识别和判断区间界线。

因此,本文依据南海 U 形线地形变化特征进行 5 区分法:南海 U 形线西北区、西区、南区、东区和东北区这 5 个区地形特征可归纳为 4 类,其中西北区和南区两区的地形最浅且变化平缓,归为第 1 类“平缓浅地形”;西区呈波峰状,归为第 2 类“波峰地形”;东区呈由南向北逐渐加深,归为第 3 类“指数状地形”;东北区呈波谷状,归为第 4 类“波谷地形”。有研究采用 GIS 技术归纳了约 30% 的南海 U 形线的地形归属,本研究分析的整个南海 U 形线地形分布特征和分区依据,与前人研究得出的南海疆界线下伏地形相互印证^[6,15];西北区位于北部湾盆地,西区位于越东断裂,南区位于曾母盆地,东区位于南沙海槽,东北区位于马尼拉海沟西缘和吕宋海槽。而本研究是对完整的南海 U 形线水深地形的分析和三维展示,完善了其

余约 70% 的南海 U 形线的水深信息,并进行了完整的地形特征的三维展示。该南海 U 形海疆线的地形分布特征的整体分析和首次提出的分区方法,能为南海 U 形线整体的系统研究作好铺垫。

4.2 季风对南海 U 形线 5 个区间的海洋环境季节变化的影响

(1)季风是南海 U 形线 5 个区 2014 年海洋动力因素变化的重要影响因素(图 3,图 4)。

西北区地处湾内,主要由季风引起的 SSCs 变化间接影响该区域其他要素变化。春季是季风转换季,该区主要受东南风影响,SSCs 强度很弱,SLA 低,海洋混合很弱,MLD 很浅^[20],因此海洋盐度变化较弱;夏季西南季风产生的西区强离岸流,使该区域 SSCs 辐散^[21],该区域 SLA 全年最低,混合层抬升变浅;秋冬季因季风产生的东西贯穿流明显增强,海水堆积增加,SLA 明显升高,强冷东北季风使 SST 下降,温度层结不稳定,埃克曼输送和抽吸明显增强,MLD 整体加深。该区由于被大陆环抱,温度受陆源影响较大。

西区春季由于段内南部弱东南向流和海盆处反气旋式涡旋的共同作用,段内北部 SLA 升高,其余区域 SLA 较低;夏季西南季风在该区域产生强东北向离岸流,并产生 SSCs 偶极结构^[21],使该区 SLA 出现波峰和波谷,混合层略有加深,SST 有所增加;秋季为季风过渡季,南海中北部转为东北风,南海南部的西南风尚未消退,东北风强冷使东北部风速最大,东北风使吕宋海峡西太平洋入侵流明显增强,出现明显从东北横穿南海北部并沿南海 U 形线西区从中南半岛南端流出的强贯穿流^[22],西区出现西南向海流^[23],埃克曼输送和抽吸增强,MLD 整体加深,SLA 上升显著;冬季由于冷涡形成^[24],SSCs 呈明显逆时针涡旋,SLA 明显降低,强东北季风使该区海洋混合增强,混合层较深。

南区春季是季风转换季,风速较弱且 SSW 较无序,SSCs 较弱且散乱,SLA 和混合层都较浅;夏季受印度洋副热带高压影响,西南风强度大,使西区产生强东北向离岸流,其在南区附近海域引起的反气旋性涡旋的辐聚作用,使得南区整体 SSCs 较小,该反气旋性涡旋引起南区 MLD 略有增加,SLA 升高;秋季东北风逐渐形成^[25],黑潮入侵明显增强产生自东向西的贯穿流引起南海西南向的西边界流明显增强,并在南区产生强的气旋性涡旋,SSCs 汇集导致 SLA 迅速增加,涡旋则增强该区 MLD;冬季以东北风为主^[25],强劲的东北风长驱直入,南区风速仍然较强流

速仍然较大,冷涡^[24]仍然存在,SLA 与秋季相当,MLD 持续增厚。

东区春季仍然受东北风影响,虽然 SSCs 较弱,但该区 SSCs 方向大多向西离岸,使该区 SLA 较低,MLD 较浅;夏季由于西南季风在东区引起的强离岸流影响,该区 SSCs 以向岸流为主,但 SSCs 强度较小,SLA 略有增加,混合层略有加深;秋季由于季风形成的东西贯穿流在南区形成巨大的气旋性涡旋辐散作用,增加东区尤其是其南部 SLA,海洋混合也明显增强;冬季由于强东北季风的影响,该区 SSCs 增强,但较为散乱,因此 SLA 变化并不明显,混合层由于冬季风产生的海表降温有所加深。

东北区受季风影响最为强烈,且其位于西太平洋和南海海水交换区。春季 SSW 减弱但仍受东北风影响,SSCs 最强出现在吕宋口附近,黑潮入侵还不强烈,SLA 变化相对缓和,海洋混合相对较弱;夏季西南季风影响下,SSCs 略有增强,海水交换增强,该区容易产生暖涡,SLA 明显增强;秋季东北风逐渐形成,黑潮入侵明显增强,并自吕宋口和台湾海峡处产生自东向西的南海贯穿流,海洋混合增强,而流向较为一致,使 SLA 较低且区内较为均匀;冬季强劲的东北风长驱直入,风速仍保持高值,西太平洋入侵流较秋季减弱但仍很强,常形成上升流区,SLA 在东北区明显下降,但混合层明显加深。

(2)季风是 2014 年南海 U 形线 5 个区的海洋生态因素变化的重要影响因素(图 3,图 4)。

西北区冬季,太阳辐射全年最低,强劲的西北和东北季风引起强的海洋混合,埃克曼输运和抽吸增强,冷的底层水上涌到表层,SST 迅速降温至 4 个季中最低值,表层营养盐得到补充^[26],引起西北区表层 Chl *a* 迅速增长。

西区春季东北季风的减弱^[27],使得冬季位于西区的冷舌已不明显,上升流减弱,SSS 下降,SST 增加较大,季风较弱,风速小,SST 上升迅速,不利于混合层加深,海流上升运动较弱,限制整体的海表 Chl *a*;夏季盛行西南季风,西边暖水向东堆积,太阳辐射强^[28],SST 增加迅速,海流呈气旋式流向^[29],出现强离岸流,引起该区强的上升流,同时夏季为雨季,营养盐的陆源输入增加,因此夏季海表 Chl *a* 整体高于春季,且沿岸有所上升;秋季东北季风逐渐建立,海面吸收的太阳辐射减少,海表整体降温^[30],出现冷水区,存在上升流,海洋混合整体有所增强,SSS 变化不大,但低温环境为海表 Chl *a* 升高提供了条件。

南区夏季盛行西南季风,西边暖水向东堆积,太阳辐射强^[28],SST 增加迅速,海流呈气旋式流向^[29],海洋混合增强,SSS 增加较明显,夏季海表 Chl *a* 整体高于春季。

东区冬季,强劲的东北季风引起海洋混合增强,艾克曼输运和抽吸增强,SST 迅速降温至 4 个季节中最低值,表层营养盐得到补充,表层 Chl *a* 增长。

东北区春季由于高温高盐黑潮水在冬季持续东北季风作用下与东北区海水有较充分混合,SSS 较高,SST 较冬季有所增加,整体 SST 上升迅速,不利于混合层加深,海流上升运动较弱,限制整体的海表 Chl *a*;冬季东北季风引起海洋混合明显增强,并且常伴有冷涡生成,底层营养盐的向上输运促进表层 Chl *a* 增长。

4.3 南海 U 形线 5 个区间的海洋环境特征对比

南海 U 形海疆线各区间所取的各要素的值(图 8)都是各区间各要素的均值再均一化后的值,均一化方法采用各区间各要素的均值除以所有区间对应要素的最大值的方式,即该方法求得均一化值也可表示各区间对应要素均值相对于对应要素均值的最大值的相对大小,其中 SLA 数据由于具有正负,因此采用该均一化方法后均一化值可能出现负值,负值表示海表海水高度低于该区域多年 SLA 均值。

结合图 3 和图 8 可知,南海 U 形海疆线西北区较之于其他区,受半封闭性的近岸浅地形影响,呈现 SST 季节变化最大,海表 Chl *a* (4 个季节占比大于 30%)最高且季节变化大的区域性海洋环境特征(表 1);南海 U 形海疆线西区位于强西边界流区,相比其他区,呈现 MLD 变化最大,SST 和 SSCs 变化剧烈,但海表 Chl *a* 季节相对变化最小的特征(表 1);南海 U 形海疆线南区较之于其他区,可能由于该区附近岛礁众多,陆源输入和季风影响使其呈现 MLD 最浅且季节变化最弱、风速和 SSCs 季节变化最大(最大增幅>50%)、海表 Chl *a* 季节相对变化较大的海洋环境特征(表 1);南海 U 形海疆线东区位于西太平洋暖池与副高交界区,相比其他区呈现 SSS 季节变化最大(最大增幅>2.5%)、平均海表风速和 SST 季节变化大、海表 Chl *a* 季节相对变化较大的特征(表 1);南海 U 形海疆线东北区较之其他 4 个区,呈 SSW、SSCs 和 SLA 季节变化较大、海表 Chl *a* 变化小的特征(表 1),季风、台风的“风泵效应”^[21,26,31-33]和黑潮入侵都可能是其影响因素。该南海 U 形海疆线的简略的单年份海洋环境分布特征的整体分析能为南海 U 形线系统

的海洋环境研究提供参考。

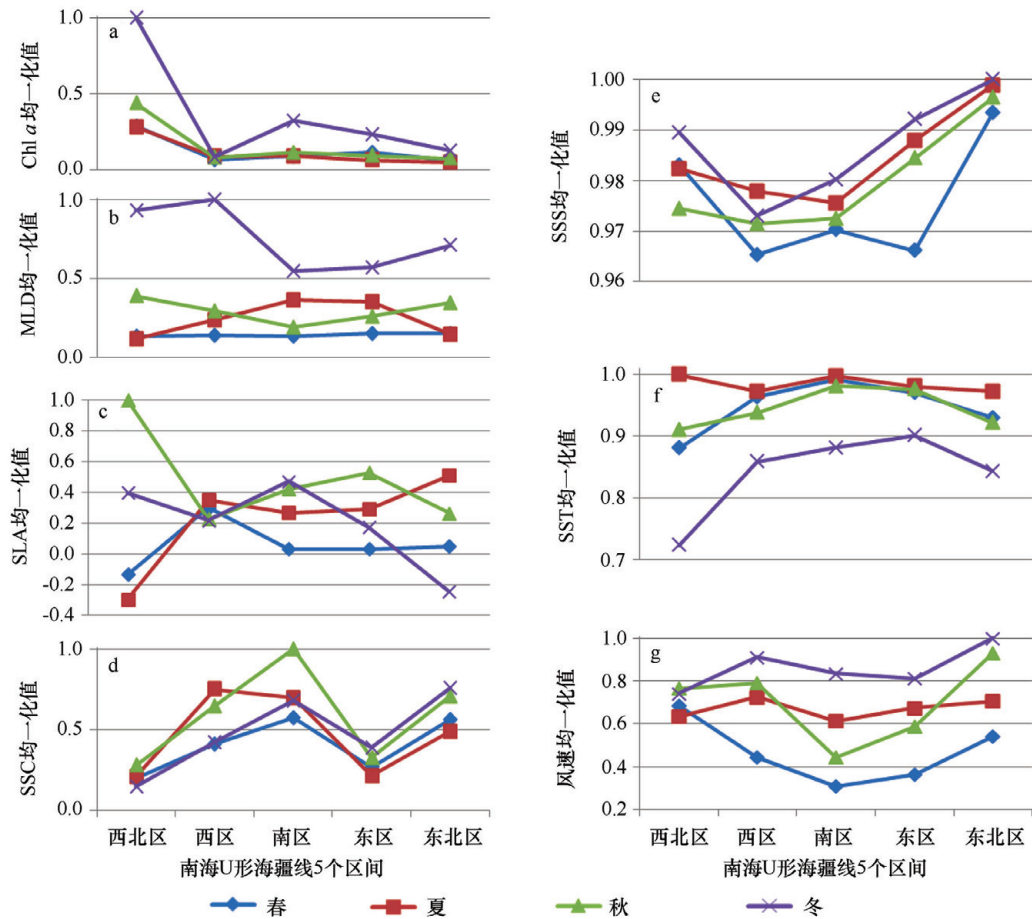


图 8 南海 U 形海疆线 5 个区间 4 个季节相同要素(均值)的归一化值的折线图

Fig.8 The line graph of each element (mean value) in all four seasons on all five zones in the U-boundary in the South China Sea

4.4 经过南海 U 形海疆线的台风路径

1945 年是最早的可获得详实和完备的台风数据记录的年份,故统计 1945—2016 年跨过南海 U 形海疆线的台风数共 604 个(图 7),年均 8 个台风影响南海 U 形线上的海洋环境,其中 1949—1999 年年均 7~8 个台风经过南海 U 形线,与前人研究 1949—1999 年年均 7 个台风相符^[34]。台风过境时间长,对海洋理化因素和海洋生态因素的影响通常能够持续 1 到 3 周不等^[35]。每年台风存在明显的季节性变化,主要产生于秋季 7—9 月份,占全年台风数的 50%以上,这与前人研究结果:7—10 月热带气旋发生最频繁相符^[36]。1991—2000 年为 1945 年至今台风最多的 10 年,与前人研究 1999—2009 年西北太平洋地区热带气旋发生次数有减少趋势,2000—2009 年年均发生次数比 1990—1999 年年均少 3 次的结果相符^[34]。图 7

显示,仅 2011—2016 年台风数为年均 10 个以上,可以预测 2011—2020 年也将是一个台风爆发期。台风路径主要集中在 U 形线西北区、东北区和东区,7°N 以南台风仅占不到 1%,这与近赤道地转偏向力很小且温度梯度小有关^[37]。而经过南海 U 形线 112.3°E 以东的台风数达 537 个,经过其 112.3°E 以西的台风 415 个,86%的台风从西太平洋产生,从南海 U 形线东北区和东区经过南海 U 形线,最远到达西区和西北区,主要影响东北区、西北区和东区,与前人研究进入南海的台风主要起源于西太平洋马里亚纳海沟附近^[38],热带气旋分布在南海中北部以东、菲律宾吕宋岛以东最密集^[36]一致。台风与南海 U 形线东北区、西北区、东区的海洋生态环境变化相关(图 3),且对东区的影响大于西区和南区,对东北区、东区和西北区影响最为深远,如 2014 年台风的“风泵效

应”^[21,26,31-33]对东北区和东区南海 U 形线生态因素具加速作用。

5 结论

本文以完整的南海 U 形海疆国界线作为对象,首次研究其自然属性,开拓了南海 U 形海疆国界线研究的新领域。

(1)本文全面认识了整个南海 U 形海疆线西浅东深的水深特征,并首次提出南海 U 形海疆线的五区间分法。依据“平缓型”、“波峰型”、“指数型”和“波谷型”4种地形特征将南海 U 形海疆线分为西北(平缓型)、西(波峰型)、南(平缓型)、东(指数型)和东北(波谷型)5个区间,南海 U 形海疆线全长大于 4 000 km。

(2)南海 U 形线 5 个区间与南海地质构造契合。西北区位于北部湾盆地和莺歌海盆地,西区与越东断裂走向一致,南区与曾母盆地南缘和万安盆地西缘吻合、东区贴合南沙海槽东缘、东北区与马尼拉海沟西缘走向一致。

(3)南海 U 形海疆线 5 个区间的海表 Chl *a* 季节

变化差异大;其西北区海表浮游植物浓度最高季节变化最大,东区和南区海表 Chl *a* 高季节变化相对较大,而西和东北区海表 Chl *a* 最低且季节变化小。5 个区间呈现明显区域性海洋环境特征;西北区 SST 和海表 Chl *a* 季节变化最大,西区 MLD 季节变化最大,南区 SSCs 季节变化最大,东区 SSS 季节变化最大,东北区 SSW 变化大但海表 Chl *a* 季节变化小。季风、台风、黑潮和陆源输入共同影响南海 U 形线海洋生态环境。

(4)台风在南海 U 形海疆线上呈不均匀分布,“风泵效应”东区强于西区。1945—2016 年期间,穿过 U 形海疆线的台风数年均 8 个,99%集中在 7°N 以北。台风发生时间 36.4%集中在 9—10 月,影响南海 U 形线的西北和东北区台风占 70%。

致谢:感谢广东省海洋遥感重点实验室 LORS 和国家热带海洋环境重点实验室的联合资助,感谢南海海洋研究所提供的数据支持,感谢课题组成员的帮助,感谢南京大学王颖院士的鼓励和支持。

参考文献:

- [1] 唐丹玲, 刘宇鹏, 郝晓光, 等. 国界线和行政区线表示南海 U 形海疆线的地图[J]. 科学通报, 2018, 63(9): 856—864.
Tang Danling, Liu Yupeng, Hao Xiaoguang, et al. A newly-discovered historical map using both national boundary and administrative line to represent the U-boundary in the South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(9): 856—864.
- [2] 葛红亮. 论南海“断续线”的对外传播[J]. 东南亚研究, 2016(4): 42—49.
Ge Hongliang. A research on the international communication of the dotted line in South China Sea[J]. Southeast Asian Studies, 2016(4): 42—49.
- [3] 马紫枫. 国防前哨的南海诸岛[J]. 科学大众, 1951(9): 85—86.
Ma Zifeng. Defense outposts of the South China Sea Islands[J]. Popular Science, 1951(9): 85—86.
- [4] 徐志良. 民国海疆版图演变与南海断续国界线的形成[J]. 太平洋学报, 2010, 18(4): 92—97.
Xu Zhiliang. The enlargement of the ocean area of the Republic of China and the intermittent formation of state boundary line on the South Sea[J]. Pacific Journal, 2010, 18(4): 92—97.
- [5] 王颖, 葛晨东, 邹欣庆. 论证南海海疆国界线[J]. 海洋学报, 2014, 36(10): 1—11.
Wang Ying, Ge Chendong, Zou Xinqing. Evidence of China's maritime boundary in the South China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2014, 36(10): 1—11.
- [6] 于贺伟. 论南海 U 型线的双重法律属性[J]. 河北科技大学学报: 社会科学版, 2015, 15(2): 52—57.
Yu Hewei. A discussion of the double legal status of U-shape line in the South China Sea[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology: Social Sciences, 2015, 15(2): 52—57.
- [7] 张耀光, 刘锴, 刘桂春. 从地图看中国南海海域疆界线的形成与演进——中国南海九条断续国界线[J]. 地理科学, 2012, 32(9): 1033—1040.
Zhang Yaoguang, Liu Kai, Liu Guichun. The evolvement of the state maritime boundary in South China Sea by maps: China's nine-dotted maritime boundary line in South China Sea[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(9): 1033—1040.
- [8] 李国强. 从地名演变看中国南海疆域的形成历史[J]. 中国边疆史地研究, 2011, 21(4): 50—59.
Li Guoqiang. A review on the formation history of the territory of the South China Sea by analyzing the evolvement of toponyms[J]. China's Borderland History and Geography Studies, 2011, 21(4): 50—59.
- [9] 任念文. “中国南海”范畴及我国行使主权沿革考——兼论“南海断续线”作为中国传统海疆线的历史依据[J]. 太平洋学报, 2013, 21(2): 85—98.
Ren Nianwen. A historical overview of the scope of the South China Sea and China's Exercising of sovereignty in the area——And on the historical basis of “Intermittent Lines in the South China Sea” as China's traditional maritime boundary[J]. Pacific Journal, 2013, 21(2): 85—98.
- [10] 李金明. 中国南海断续线: 产生的背景及其效用[J]. 东南亚研究, 2011(1): 41—47.

- Li Jinming. The Chinese U-shaped line in the South China Sea: its background and effectiveness[J]. *Southeast Asian Studies*, 2011(1): 41—47.
- [11] 唐盟, 马劲松, 王颖, 等. 1947 年中国南海断续线精准划定的地形依据[J]. *地理学报*, 2016, 71(6): 914—927.
- Tang Meng, Ma Jinsong, Wang Ying, et al. Spatial demarcation principles of the dotted line in the South China Sea[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(6): 914—927.
- [12] 潘艳丽, 唐丹玲. 南沙群岛部分岛礁的 Landsat7 ETM⁺ 图像观察[J]. *热带海洋学报*, 2007, 26(1): 87—88.
- Pan Yanli, Tang Danling. Preliminary observations of Nansha Reefs based on Landsat7 ETM⁺ images[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2007, 26(1): 87—88.
- [13] 苏纪兰. 南海环流动力机制研究综述[J]. *海洋学报*, 2005, 27(6): 1—8.
- Su Jilan. Overview of the South China Sea circulation and its dynamics[J]. *Haiyang Xuebao*, 2005, 27(6): 1—8.
- [14] 乐凤凤, 宁修仁, 刘诚刚, 等. 2006 年冬季南海北部浮游植物生物量和初级生产力及其环境调控[J]. *生态学报*, 2008, 28(11): 5775—5784.
- Le Fengfeng, Ning Xiuren, Liu Chenggang, et al. Standing stock and production of phytoplankton in the northern South China Sea during winter of 2006[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5775—5784.
- [15] 夏戡原, 夏综万, 赵明辉, 等. 我国南海历史性水域线的地质特征[J]. *海洋学报*, 2014, 36(5): 77—89.
- Xia Kanyuan, Xia Zongwan, Zhao Minghui, et al. The geological basis of the China historical sea lines in South China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2014, 36(5): 77—89.
- [16] 赵伟, 侯一筠, 乐肯堂, 等. 吕宋海峡水交换季节变化的数值研究[J]. *海洋与湖沼*, 2007, 38(6): 495—503.
- Zhao Wei, Hou Yijun, Le Kentang, et al. Numerical study on seasonal variation of water exchange in the Luzon Strait[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2007, 38(6): 495—503.
- [17] Wang S C. 中国南海的板内冲断层地震[J]. 梁慧云, 译. *地震地质译丛*, 1981(3): 13—15.
- Wang S C. An intraplate thrust earthquake in the South China Sea[J]. Liang Huiyun, trans. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1981(3): 13—15.
- [18] 李旭, 杨牧. 加里曼丹及邻区壳体的运动与演化[J]. *大地构造与成矿学*, 2002, 26(3): 235—239.
- Li Xu, Yang Mu. Movement and evolution of crustobody in Kalimantan and adjacent areas[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2002, 26(3): 235—239.
- [19] Wang Ying, Ge Chendong, Zou Xinqing. Evidence of China's sea boundary in the South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(4): 1—12.
- [20] 孙成学, 刘秦玉, 贾英来. 南海混合层深度的季节变化及年际变化特征[J]. *中国海洋大学学报*, 2007, 37(2): 197—203.
- Sun Xuecheng, Liu Qinyu, Jia Laiying. Annual and interannual variations of the mixed layer in the South China Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2007, 37(2): 197—203.
- [21] 梁文钊, 唐丹玲. 南海西部夏季表层浮游植物粒径结构分布特征分析[J]. *热带海洋学报*, 2017, 36(4): 93—101.
- Liang Wenzhao, Tang Danling. Distribution characteristics of phytoplankton size structure in the western South China Sea in summer[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2017, 36(4): 93—101.
- [22] 聂宇华, 詹杰民, 陈植武. 南海表层环流和热结构特征的数值模拟与影响因素分析[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2011, 50(2): 134—138.
- Nie Yuhua, Zhan Jiemini, Chen Zhiwu. Simulation and influence factor analysis of circulation and thermal structure of the surface layer of the South China Sea[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2011, 50(2): 134—138.
- [23] Tang Danling, Kawamura H, Lee M A, et al. Seasonal and spatial distribution of chlorophyll-*a* concentrations and water conditions in the Gulf of Tonkin, South China Sea[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85(4): 475—483.
- [24] Wyrtki K. Scientific results of marine investigations of the South China Sea and the Gulf of Thailand 1959—1961[R]. NAGA Report, La Jolla, CA: Scripps Institution of Oceanography, 1961.
- [25] 张德天, 郑崇伟, 石岭琳, 等. 基于 QuikSCAT/NCEP 风场的 1999—2009 年中国海表风场研究[J]. *海洋预报*, 2011, 28(4): 58—64.
- Zhang Detian, Zheng Chongwei, Shi Linglin, et al. Sea surface wind field analyze from 1999 to 2009 in the China Sea by QuikSCAT/NCEP data[J]. *Marine Forecasts*, 2011, 28(4): 58—64.
- [26] Tang Danling, Kawamura H, Doan-Nhu H, et al. Remote sensing oceanography of a harmful algal bloom off the coast of southeastern Vietnam[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109(C3): C03014.
- [27] 阎俊岳. 南海西南季风爆发的气候特征[J]. *气象学报*, 1997, 55(2): 174—186.
- Yan Junyue. Climatological characteristics on the onset of the South China Sea southwest monsoon[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1997, 55(2): 174—186.
- [28] 杨海军, 刘秦玉. 南海上层水温分布的季节特征[J]. *海洋与湖沼*, 1998, 29(5): 501—507.
- Yang Haijun, Liu Qinyu. The seasonal features of temperature distributions in the upper layer of the South China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1998, 29(5): 501—507.
- [29] 施平, 杜岩, 王东晓, 等. 南海混合层年循环特征[J]. *热带海洋学报*, 2001, 20(1): 10—17.
- Shi Ping, Du Yan, Wang Dongxiao, et al. Annual cycle of mixed layer in South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2001, 20(1): 10—17.

- 10—17.
- [30] Tang Danling, Ni I H. Remote sensing of Hong Kong waters: spatial and temporal changes of sea surface temperature[J]. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 1996, 35(2): 173—186.
- [31] 宋勇军, 唐丹玲. 南海东北部混合层深度对热带气旋海鸥和凤凰的响应[J]. *热带海洋学报*, 2017, 36(1): 15—24.
Song Yongjun, Tang Danling. Mixed layer depth responses to tropical cyclones Kalmaegi and Fung-Wong in the northeastern South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2017, 36(1): 15—24.
- [32] Chen Yongqiang, Tang Danling. Eddy-feature phytoplankton bloom induced by a tropical cyclone in the South China Sea[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(23): 7444—7457.
- [33] Wang Jiujuan, Tang Danling, Sui Yi. Winter phytoplankton bloom induced by subsurface upwelling and mixed layer entrainment southwest of Luzon Strait[J]. *Journal of Marine Systems*, 2010, 83(3/4): 141—149.
- [34] 刘欢, 刘荣高. 1990 年—2009 年西北太平洋热带气旋活动分析[J]. *资源科学*, 2012, 34(2): 242—247.
Liu Huan, Liu Ronggao. Tropical cyclones activities in the western North Pacific from 1990 through 2009[J]. *Resources Science*, 2012, 34(2): 242—247.
- [35] 杨晓霞, 唐丹玲. 台风引起南海海面降温的位置变化特征[J]. *热带海洋学报*, 2010, 29(4): 26—31.
Yang Xiaoxia, Tang Danling. Location of sea surface temperature cooling induced by typhoon in the South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, 29(4): 26—31.
- [36] 周俊华, 史培军, 陈学文. 1949—1999 年西北太平洋热带气旋活动时空分异研究[J]. *自然灾害学报*, 2002, 11(3): 44—49.
Zhou Junhua, Shi Peijun, Chen Xuewen. Spatio-temporal variability of tropical cyclone activities in the western North Pacific from 1949 to 1999 [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2002, 11(3): 44—49.
- [37] 王东生, 屈雅. 西北太平洋和南海热带气旋的气候特征分析[J]. *气象*, 2007, 33(7): 67—74.
Wang Dongsheng, Qu Ya. Climatic characteristics of tropical cyclones over northwestern Pacific and South China Sea[J]. *Meteorological Monthly*, 2007, 33(7): 67—74.
- [38] Yan Junyue, Zhang Xiuzhi, Li Jianglong. Climatological features of rapidly intensifying (RI) tropical cyclones in NW Pacific West of 135° E[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 1998, 4(1): 8—15.

Zoning of the U-boundary in the South China Sea and its ecological environment characteristics

Liu Yupeng^{1,2,3}, Tang Danling^{1,2,3,4}, Wu Changxia^{1,5}, Ge Chendong^{6,7,8}

(1. *State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China*; 2. *Guangdong Key Laboratory of Ocean Remote Sensing, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 4. *Collaborative Innovation Center for 21st-Century Maritime Silk Road Studies, Guangzhou 510420, China*; 5. *Dalhousie University, Halifax B3H 4R2, Canada*; 6. *Key Laboratory of Coast & Island Development, Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210023, China*; 7. *Collaborative Innovation Center of South China Sea Studies, Nanjing University, Nanjing 210093, China*; 8. *School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China*)

Abstract: U-boundary of the South China Sea (short name as U-boundary of SCS) is China's sea boundaries. Based on GIS and various remote sensing data, this paper studies the terrain and marine eco-environment of the U-boundary for the first time, mainly analyzing water depth and environmental characteristics, and presenting the three-dimensional characteristics of water depth distribution of the U-boundary. This study divides the U-boundary into five zones: the northeastern zone (NE), northwestern zone (NW), eastern zone (E), western zone (W), and southern zone (S) according to the terrain characteristics. In the NW and S, the terrains are gentle ($<1\ 000\text{ m}$); the W with the peak distribution is $2\ 303\text{ m}$ in average. The water depth in the E is over $2\ 000\text{ m}$ with an increase from south to north. The water depth of the NE is trough and the deepest water reaches $3\ 535\text{ m}$. The study shows that the topography of NW, W, S, E and NE of the U-boundary are consistent with the Beibu Gulf Basin, the Vietnam East Fault, the Zengmu Basin, the South China Sea Trough, and Manila Trench respectively. The results

show the impact of monsoon on the seasonal variations in the 5 zones of the U-boundary; in the NW and NE of the U-boundary, the sea surface temperature (SST) is the highest in summer, with high variation and the mixed layer depth are deepest in winter and lowest in spring while the seasonal variation of sea surface currents (SSCs) and sea surface salinity (SSS) are small. But in the NW, concentration of chlorophyll *a* blooms in winter and presents logarithmic distribution in other seasons, while that increase slightly in the middle of the NE in winter. The seasonal variations of SST in the W, S and E are small, while the seasonal variations of the sea surface wind field (SSW) and the mixed layer depth (MLD) are the strongest in winter but the weakest in spring. But the seasonal variation of the sea surface chlorophyll *a* concentration (Chl *a*) in the W is small while that in the middle of the S increases significantly in winter, and that in the south of the E increases slightly in winter. Marine factors in NW and S (shallow terrain) show the same seasonal distribution, especially the high Chl *a* in both NW and S zones in winter. The study also reveals the regional characteristics of the marine environments among 5 zones of the U-boundary. The largest seasonal variations in the SST and Chl *a* occur in NW zone while the largest seasonal change of the MLD appears in W zone and the largest seasonal change of the SSCs occurs in S zone. And the largest seasonal variation in the SSS is found in the E zone while a large change in the SSCs but a small seasonal variation in the Chl *a* is found in the NE zone. The temporal and spatial distributions of typhoon on the U-boundary are different from north to south, and its distribution is not uniform. A total of 604 typhoons crossed the U-boundary, with an average of 8 per year from 1945 to 2016. The paths concentrate in the NE, NW and E zones. 537 typhoons crossed the U-boundary within the east of 112.3° E, while 415 typhoons crossed the U-boundary within the west of 112.3° E. The ecological environments of the NE zone are greatly influenced by “Wind Pump Effect” caused by typhoon. 1991 to 2000 is a typhoon-prone period, with an average of 11 typhoons across the U-boundary. In this study, the proposed method of dividing the U-boundary in the SCS into 5 zones based on its topographical features has important scientific and practical significance.

Key words: U-boundary in the South China Sea; terrain; 5-zones distinction method of U-boundary; marine ecological environment; seasonal variation; typhoon